

УДК 658.5.012

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДА ПЛАНОВО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНОГО КОМПЛЕКСА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**А.В. Доронин, А.И. Коваленко, Г.Н. Рогачев*Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: grogachev@mail.ru

Работа лаборатории литейно-прокатного стана моделируется как одноканальная система обслуживания с мгновенным обслуживанием и резервным прибором (оптико-электронным спектрометром). Моменты поступления проб на анализ (отбор проб производится в процессе плавки коррозионностойких сталей, горячекатаного проката из рулонов) образуют пуассоновский поток. Спектральный анализ осуществляется корректно с переменной во времени вероятностью. Найдено стационарное распределение вложенной цепи Маркова как решение системы интегральных уравнений. Сформулирована и решена задача многокритериальной оптимизации проведения планово-предупредительных работ. Построены имитационные модели функционирования лаборатории.

Ключевые слова: лаборатория литейно-прокатного комплекса, резервный прибор, скрытый отказ, система обслуживания, стационарное распределение вложенной цепи Маркова, стационарные характеристики, многокритериальная оптимизация.

В лаборатории литейно-прокатного комплекса (ЛЛПК) производится анализ проб в процессе плавки коррозионностойкой стали и горячекатаного проката в рулонах. Для контроля химического состава расплава в ЛЛПК установлены два оптико-электронных спектрометра. В ЛЛПК 1 раз в неделю производятся планово-предупредительные работы (ППР), включающие чистку линзы, замену медных и титановых трубок подачи газа, чистку/замену высоковольтных изоляторов. При отказе спектрометра проводится аварийное восстановление (АВ).

На основе системного подхода и анализа иерархических структур [1] выявлен и формализован процесс проведения ППР в ЛЛПК как объект управления на этапе проектирования работы ЛЛПК. Отправка проб на анализ в ЛЛПК происходит почти на всех стадиях производственных процессов плавки и проката коррозионностойкой и некоррозионностойкой стали (рис. 1). Кроме того, неисправность оборудования ЛЛПК недопустима в процессе оценки соответствия продукции литейно-прокатного комплекса. Так, минута простоя печи стоит от 3 млн рублей. Декомпозиция иерархической структуры технологического процесса литейно-прокатного комплекса позволила выделить ЛЛПК как подсистему спектрального анализа состава проб с учетом связей с остальными подси-

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Самарской области в рамках научного проекта № 17-48-630410 p_a.*

Артем Владимирович Доронин, аспирант.

Анна Игоревна Коваленко, аспирант.

Геннадий Николаевич Рогачев (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

стемами технологического процесса. Были разработаны структурная схема (рис. 2) и блок-схема (рис. 3) функционирования ЛЛПК.



Рис. 1. Иерархическая структура технологического процесса литейно-прокатного комплекса

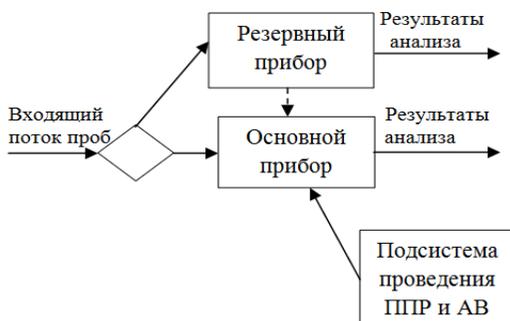


Рис. 2. Структурная схема функционирования ЛЛПК

Системный подход и анализ иерархических структур позволяют сделать анализ причинно-следственных связей характеристик ЛЛПК и литейно-прокатного комплекса в целом и осуществить их качественную оценку.

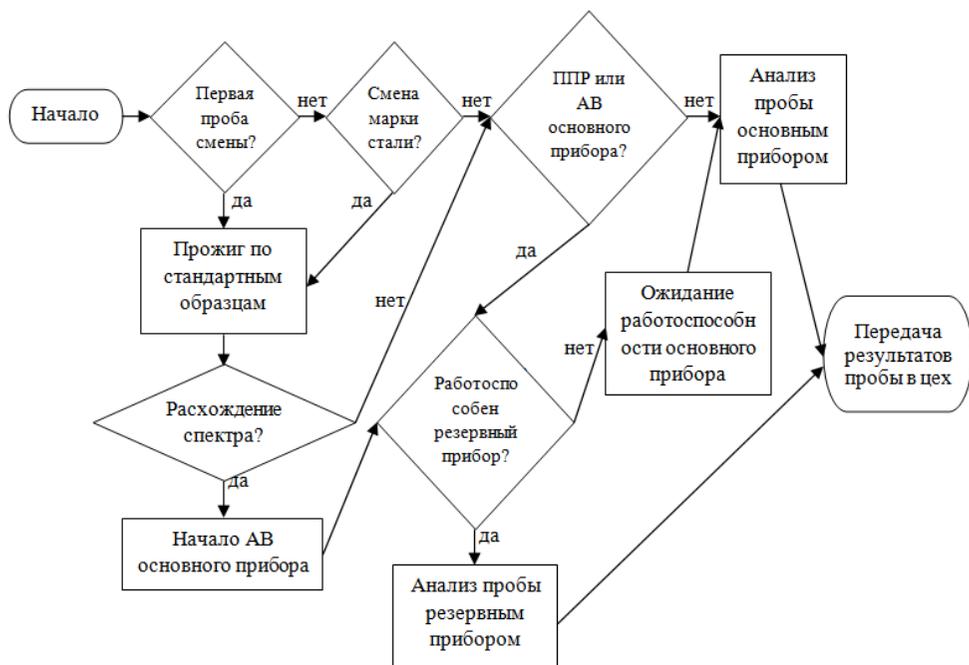


Рис. 3. Блок-схема функционирования ЛЛПК

Описание работы ЛЛПК приведено в табл. 1.

Таблица 1

Описание работы ЛЛПК

Показатель	Значение
Интервал между поступлениями проб для спектрального анализа	Экспоненциальное распределение (интенсивность $\lambda = 13,9 \text{ час}^{-1}$)
Вероятность нормальной работы основного прибора, зависящая от времени t , прошедшего после ППР	$p(t) = 1 - 0,0001t$
Вероятность анализа пробы с прожигом по стандартным образцам	$q = 0,27, q = 1 - p$
Периодичность ППР	Детерминированная величина τ
Время проведения аварийного восстановления (АВ) основного прибора, ч	ФР $F(t) = P\{\alpha \leq t\}, F(t) = 1 - F(t)$, распределение Эрланга 2-го порядка; среднее значение $E\alpha = 0,5$
Время проведения ППР основного прибора, ч	ФР $\Phi(t) = P\{\gamma \leq t\}, \Phi(t) = 1 - \Phi(t)$, распределение Эрланга 2-го порядка; среднее значение $E\gamma = 2$
Вероятность исправности резервного прибора	$p_1 = 0,96, q_1 = 1 - p_1$
Доход в единицу времени исправной работы хотя бы одного прибора, руб/час	$c_1 = 800$
Затраты в единицу времени АВ основного прибора, руб/час	$c_2 = 1400$

Показатель	Значение
Затраты в единицу времени ППР основного прибора, руб/час	$c_3 = 700$
Затраты в единицу времени скрытого отказа основного прибора, руб/час	$c_4 = 4600$
Затраты в единицу времени отказа резервного прибора, руб/час	$c_5 = 5600$

Аналитическая модель функционирования ЛЛПК

Для описания функционирования ЛЛПК используем полумарковский процесс $\xi(t)$ с дискретно-непрерывным множеством состояний [2], как это сделано, например, в [3].

Для этого определим фазовое пространство состояний системы:

$$E = \{10, 10x, 10x0, s0x, 20x, 21xy, 22xy, 30, 31y, 32y, 40x; 0 < x < \tau, y > 0\}. \quad (1)$$

Здесь 10 – основной прибор начал функционировать после очередных ППР; 10x – поступила проба для анализа; прожиг по стандартным образцам не проводится, но скрытый отказ не наступил; время x прошло с момента окончания последних ППР прибора;

$s0x$ – поступила проба для анализа; проведен прожиг по стандартному образцу, расхождение спектра не обнаружено; время x прошло с момента окончания последних ППР прибора;

$10x0$ – окончен ремонт прибора; время x прошло с момента окончания последних ППР до только что законченного АВ прибора;

$20x$ – начинается АВ прибора, время x прошло с момента окончания последних ППР прибора;

$21xy$ – поступила проба для анализа, при этом основной прибор находится в состоянии ремонта; анализ успешно проводится резервным прибором; время x прошло с момента окончания последних ППР до текущего АВ прибора; время y осталось до конца АВ прибора;

$22xy$ – поступила проба для анализа, при этом основной прибор находится в состоянии АВ; резервный прибор оказался неисправным; время x прошло с момента окончания последних ППР до текущего ремонта прибора; время y осталось до конца АВ прибора;

30 – начало проведения ППР прибора;

$31y$ – поступила проба для анализа, при этом основной прибор находится в состоянии ППР; анализ успешно проводится резервным прибором; время y осталось до конца ППР прибора;

$32y$ – поступила проба для анализа, при этом основной прибор находится в состоянии ППР; резервный прибор оказался неисправным; время y осталось до конца ППР прибора;

$40x$ – поступила проба для анализа; прожиг по стандартному образцу не проводится, наступил скрытый отказ; время x прошло с момента окончания последних ППР прибора.

Временная диаграмма функционирования ЛЛПК изображена на рис. 4.

Для нахождения стационарного распределения вложенной цепи Маркова определяются плотности вероятностей переходов из состояний и составляется система интегральных уравнений для стационарного распределения. Исключени-

ем плотностей в этой системе уравнений приходим к уравнению восстановления для запаздывающего обрывающегося процесса восстановления [4], обобщенного на случай непостоянной вероятности обрыва процесса восстановления.

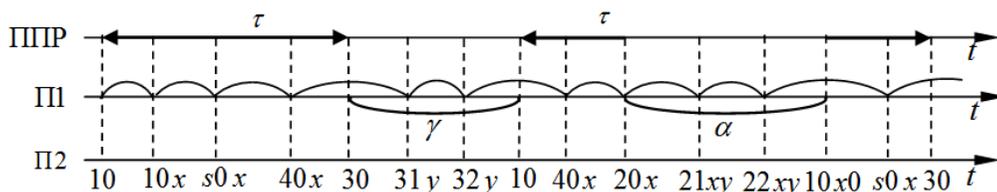


Рис. 4. Временная диаграмма функционирования системы:
П1 – первый прибор (основной), П2 – второй прибор (резервный)

Поэтому решение системы уравнений для стационарного распределения с помощью метода сжатых отображений можно записать следующим образом:

$$\rho(10x) = \rho_{30} p \lambda P(x), \quad 0 < x < \tau; \quad \rho(s0x) = \rho_{30} q \lambda P(x), \quad 0 < x < \tau;$$

$$\rho(10x0) = \rho(20x) = \rho_{30} q \lambda (1 - P(x)), \quad 0 < x < \tau;$$

$$\rho(40x) = \rho_{30} p \lambda (1 - P(x)), \quad 0 < x < \tau;$$

$$\rho(31y) = \rho_{30} p_1 \lambda \int_0^{\infty} \varphi(t+y) e^{-\lambda q_1 t} dt, \quad y > 0;$$

$$\rho(32y) = \rho_{30} \lambda \left[\bar{\Phi}(y) - p_1 \int_0^{\infty} \varphi(t+y) e^{-\lambda q_1 t} dt \right], \quad y > 0; \quad (2)$$

$$\rho(21xy) = \rho_{30} p_1 q \lambda^2 (1 - P(x)) \int_0^{\infty} f(t+y) e^{-\lambda q_1 t} dt, \quad 0 < x < \tau, \quad y > 0;$$

$$\rho(22xy) = \rho_{30} q \lambda^2 (1 - P(x)) \left[\bar{F}(y) - p_1 \int_0^{\infty} f(t+y) e^{-\lambda q_1 t} dt \right], \quad 0 < x < \tau, \quad y > 0.$$

Постоянная ρ_{30} определяется условием нормировки

$$\rho_{30} = \left[2 + \lambda(\tau + M_{\gamma}) + q\lambda(1 + \lambda M_{\alpha}) \left(\tau - \int_0^{\tau} P(x) dx \right) \right]^{-1}.$$

Здесь функция $P(x)$ определяется следующим образом:

$$P(x) = \sum_{n=0}^{\infty} P^{(n)}(x), \quad (3)$$

$$P^{(0)}(x) = p(x)(q + p e^{-\lambda x}), \quad P^{(n)}(x) = p\lambda p(x) \int_0^x P^{(n-1)}(y) e^{-\lambda(x-y)} dy, \quad n = 1, 2, \dots$$

Для определения стационарных характеристик ЛЛПК разобьем фазовое пространство состояний E (1) на непересекающиеся подмножества состояний, соответствующие различным физическим состояниям системы:

$E_1 = \{10, 10x, 10x0, s0x\}$ – основной прибор исправно функционирует, вто-

рой прибор находится в резерве;

$E_2 = \{20x, 21xy\}$ – основной прибор находится в состоянии АВ, резервный прибор работает в нормальном режиме;

$E_3 = \{30, 31y\}$ – основной прибор находится в состоянии ППР, резервный прибор работает в нормальном режиме;

$E_4 = \{40x\}$ – основной прибор находится в состоянии скрытого отказа;

$E_5 = E_{кр}^{(2)} \cup E_{кр}^{(3)}$ – критическое состояние неисправности системы, где $E_{кр}^{(2)} = \{22xy\}$ – основной прибор находится в состоянии АВ, а резервный прибор в это время работает неисправно; $E_{кр}^{(3)} = \{32y\}$ – основной прибор находится в состоянии ППР, а резервный прибор в это время работает неисправно.

С помощью математических ожиданий однократного пребывания вложенной цепи Маркова в состояниях стационарного распределения, полученного в результате решения системы интегральных уравнений (2), и функций, определяющих доход и затраты в единицу времени в каждом состоянии, определены следующие показатели работы ЛЛПК, которые представляют интерес:

– стационарный коэффициент доступности основного прибора

$$K^+(\tau) = \frac{q\tau + p \int_0^{\tau} P(x)dx + \frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{P(\tau)}{p(\tau)}\right)}{\tau + M_{\gamma} + q\lambda M_{\alpha} \left(\tau - \int_0^{\tau} P(x)dx\right)};$$

– финальная вероятность критического состояния (скрытых отказов основного или неисправности второго прибора)

$$P^{kp}(\tau) = \frac{\left(\tau - \int_0^{\tau} P(x)dx\right) \left(p + q\lambda \left[M_{\alpha} - \int_0^{\infty} \bar{F}(t)e^{-\lambda q_1 t} dt\right]\right) + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{P(\tau)}{p(\tau)} - 1\right) + M_{\gamma} - \int_0^{\infty} \bar{\Phi}(t)e^{-\lambda q_1 t} dt}{\tau + M_{\gamma} + q\lambda M_{\alpha} \left(\tau - \int_0^{\tau} P(x)dx\right)};$$

– средняя удельная прибыль в единицу календарного времени

$$S(\tau) = \frac{\left(p(c_1 + c_4) + q\lambda \left((c_2 + c_5)M_{\alpha} - (c_1 + c_5) \int_0^{\infty} \bar{F}(t)e^{-\lambda q_1 t} dt\right)\right) \left(\int_0^{\tau} P(x)dx - \tau\right) - (c_3 + c_5)M_{\gamma}}{\tau + M_{\gamma} + q\lambda M_{\alpha} \left(\tau - \int_0^{\tau} P(x)dx\right)} +$$

$$+ \frac{c_5 \int_0^{\infty} \bar{\Phi}(t)e^{-\lambda q_1 t} dt + \frac{(c_1 + c_4)}{\lambda} \left(1 - \frac{P(\tau)}{p(\tau)}\right) + c_1 \tau}{\tau + M_{\gamma} + q\lambda M_{\alpha} \left(\tau - \int_0^{\tau} P(x)dx\right)};$$

– средние удельные затраты в единицу времени исправного функционирования системы (без скрытых отказов и неисправности второго прибора)

$$C(\tau) = \frac{\left(c_4 p + q \lambda \left(c_2 M_\alpha + c_5 \left[M_\alpha - \int_0^\infty F(t) e^{-\lambda q_1 t} dt \right] \right) \right) \left(\tau - \int_0^\tau P(x) dx \right)}{\tau - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{P(\tau)}{p(\tau)} - 1 \right) + \int_0^\infty \Phi(t) e^{-\lambda q_1 t} dt + \left(\tau - \int_0^\tau P(x) dx \right) \left[q \lambda \int_0^\infty F(t) e^{-\lambda q_1 t} dt - p \right]} +$$

$$+ \frac{(c_3 + c_5) M_\gamma - c_5 \int_0^\infty \Phi(t) e^{-\lambda q_1 t} dt + \frac{c_4}{\lambda} \left(\frac{P(\tau)}{p(\tau)} - 1 \right)}{\tau - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{P(\tau)}{p(\tau)} - 1 \right) + \int_0^\infty \Phi(t) e^{-\lambda q_1 t} dt + \left(\tau - \int_0^\tau P(x) dx \right) \left[q \lambda \int_0^\infty F(t) e^{-\lambda q_1 t} dt - p \right]}.$$

Задача многокритериальной оптимизации периодичности ППР ЛЛПК имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} K^+(\tau) \rightarrow \max_{\tau \in (0, \infty)} \\ P^{kp}(\tau) \rightarrow \min_{\tau \in (0, \infty)} \\ S(\tau) \rightarrow \max_{\tau \in (0, \infty)} \\ C(\tau) \rightarrow \min_{\tau \in (0, \infty)} \end{array} \right. \quad (4)$$

Из записей в журналах ЛЛПК можно сделать вывод, что вероятность корректной работы основного прибора при поступлении очередной пробы непостоянна и зависит от времени, прошедшего с момента окончания последних ППР. В ходе обработки и аппроксимации данных определено, что лучше всего эту зависимость описывает функция времени $p(t) = 1 - 0,0001t$. На рис. 5 изображена линейная аппроксимация функции вероятности корректной работы прибора.

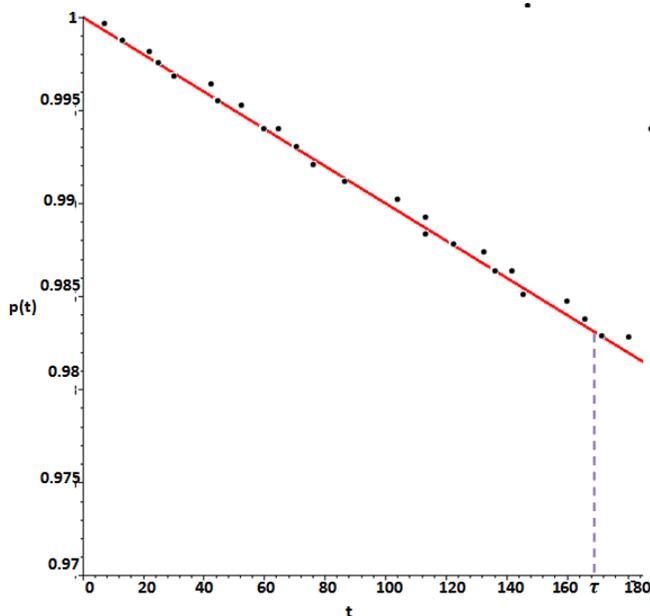


Рис. 5. Линейная аппроксимация функции вероятности корректной работы основного прибора

Численное решение задачи (4) осуществлялось в пакете Maple при учете 20 слагаемых функции $P(x)$ (3) и привело к следующим результатам (табл. 2).

Таблица 2

Результаты оптимизации периодичности ППР основного прибора ЛЛПК

Показатель	Было (стандартная стратегия)	Стало (аддитивная свертка) $\tau_{opt}^V = 76,34$	Стало (оптимизация по нечетким целям) $\tau_{opt}^O = 68,91$	Стало (максиминная свертка) $\tau_{opt}^R = 74,15$
S, руб/час	550,90	608,06	607,09	607,97
C, руб/час	233,20	177,75	178,52	177,79
K^+	0,922	0,943	0,944	0,944
P^-	0,028	0,023	0,023	0,026
ΔS (ε , %)		57,16 (10,4 %)	56,19 (10,2 %)	57,07 (10,4 %)
ΔC (ε , %)		55,45 (23,8 %)	54,68 (23,5 %)	55,41 (23,8 %)
ΔK^+ (ε , %)		0,021 (2,3 %)	0,022 (2,4 %)	0,022 (2,4 %)
ΔP^- (ε , %)		0,005 (17,9 %)	0,005 (17,9 %)	0,002 (7,1 %)

На рис. 6 представлены значения оптимальных периодов ППР, полученных при помощи аддитивной свертки при значениях c_3 от 0,05 до 1,00.

Характерной особенностью ЛЛПК является периодическая остановка процесса функционирования, после которой работа некоторое время осуществляется в переходном режиме. Аналитически получить нестационарные характеристики не представляется возможным. С целью получения характеристик в переходных режимах работы была построена имитационная модель ЛЛПК в Anylogic (рис. 7).

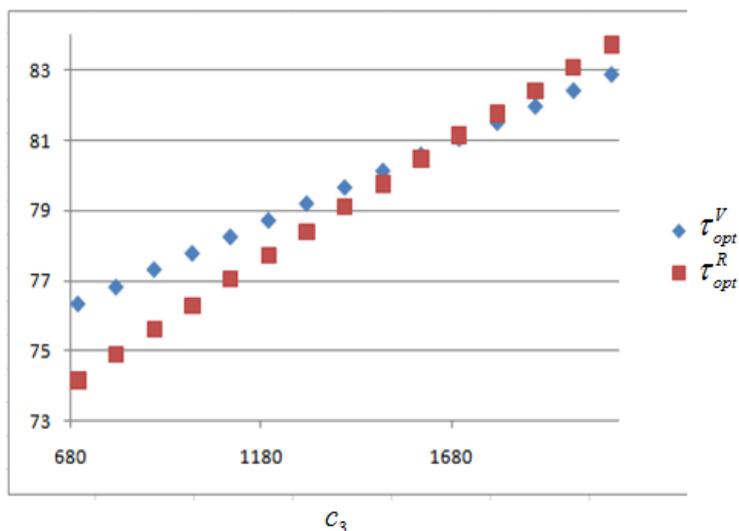


Рис. 6. Зависимость значения оптимального периода ППР от затрат на проведение ППР в единицу времени c_3 для аддитивной и максиминной свертки

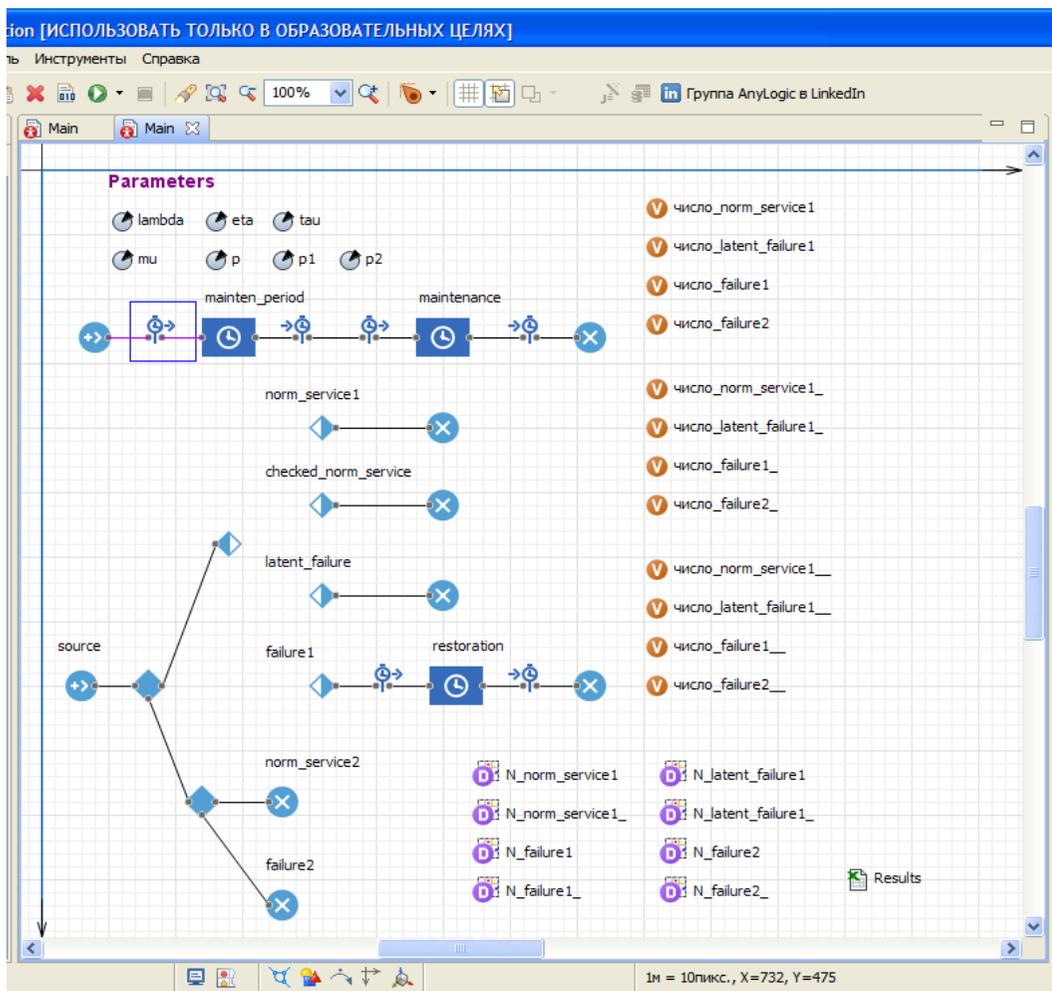


Рис. 7. Имитационная модель функционирования ЛЛПК

Выполнено 6 реализаций функционирования ЛЛПК до 1100 часов для определения характеристик переходного режима. При периоде релаксации 400 часов отклонение экономических показателей от своих стационарных значений составляет не более 137 руб/час; для операционных характеристик этот показатель – не более 0,02. Такой анализ позволяет установить временные рамки применимости полученных в работе результатов оптимизации.

Выводы

В результате многокритериальной оптимизации периодичности ППР ЛЛПК показатели эффективности и надежности функционирования улучшены по сравнению с существующей стратегией: средняя удельная прибыль увеличивается на 10 %, средние удельные затраты уменьшаются на 23 %, коэффициент доступа к первому прибору увеличивается на 2 %, а критическая вероятность неисправного функционирования системы уменьшается на 17 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чернышов В.Н., Чернышов А.В.* Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.
2. *Королюк В.С., Турбин А.Ф.* Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.
3. *Песчанский А.И., Коваленко А.И.* Полумарковская модель ненадежной однолинейной системы обслуживания с потерями и различными типами восстановления // Автоматика и телемеханика. – 2016. – №11. – С. 112-126.
4. *Кокс Д.Р., Смит В.Л.* Теория восстановления. – М.: Сов. радио, 1967. – 299 с.

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2017 г.

OPTIMIZATION OF PREVENTIVE MAINTENANCE PERIOD IN THE LABORATORY OF CASTING AND ROLLING COMPLEX OF METALLURGICAL ENTERPRISE

A.V. Doronin, A.I. Kovalenko, G.N. Rogachev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The operation of the laboratory of casting and rolling complex is considered as a one-server queue with immediate service and a reserved server (electro-optical spectrometer). The moments of samples incoming for analysis (while casting and rolling corrosion-resistant steel) make a Poisson input. Spectral analysis of samples is carried out correctly with variable probability. The embedded Markov chain stationary distribution is obtained as the solution of integral equations. The problem of multi-criteria optimization of preventive maintenance period is set and solved. Simulation models of the laboratory operation are constructed.

Keywords: *laboratory of casting and rolling complex, reserved server, latent failure, queuing system, embedded Markov chain stationary distribution, stationary characteristics, multi-criteria optimization.*

*Artem V. Doronin, Postgraduate Student.
Anna I. Kovalenko, Postgraduate Student.
Gennady N. Rogachev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*